中学校理科「放射線」に関する学習・指導のための基礎研究Ⅰ
ー簡易放射線測定器「はかるくん」の特性及び測定方法ー

内田由美子*・重松　宏武

A Fundamental Study for Learning and Teaching about "Radiation"
in Science Classes of Junior High Schools I:
the property and measuring procedure of a simple radioactivity measuring device "Hakaru-kun"

UCHITA Yumiko, SHIGEMATSU Hirotake
（Received January 10, 2012）

キーワード：放射線教育、簡易放射線測定器「はかるくん」、中学校理科、新学習指導要領

はじめに

平成24年度から本格的に実施される中学校理科新学習指導要領(以下、新学習指導要領という)に「放射線」が加わる[1)]。そのため多くの教育機関関係者によって「放射線」学習実践に向けた教材・カリキュラム開発が活発に行われ、さらにこれらを活用した実践報告が数多くされてきた。これは、現役の教員に「放射線」学習指導の経験者が少ないことや、「放射線」に関する知識が専門的で理解しにくいことが危惧されたためである。くしくも、平成23年3月11日に東日本大震災の津波被害による福島第一原子力発電所の事故が起こり、ますます国民の間に放射線についての関心が高まり、これまで以上に中学校理科教員に放射線に関する広く深い知識や指導力を持つことが要求されるようになった。従来公開されてきた多くの授業カリキュラム案や教材の活用方法[2)]は、授業の参考としては有益な情報であるが、定性的かつ体験的な学習内容であるため、指導者が生徒からの質問に明確に回答できる程のより定量的かつ具体的な知識として十分であるとは言い難い。そこで本論文では、「放射線」について一般的に説明されている学習内容を基礎として、中学校理科教員として知っていると役立つ知識、もしくは知るべき基礎知識をまとめた内容を示す。例えば、多くの教育現場で活用されている簡易放射線測定器「はかるくん」における空間測定分布や測定回数に関する評価等、既に報告・公開されている教員向けの指導書には書かれていない部分を実験や計測により系統的に評価するなど色々な角度から検討しており、実践に向けた基礎知識として活用できる内容となっている。

１．一般的な中学校理科「放射線」学習

中学校理科での「放射線」学習については、“新学習指導要領　第1分野(7)科学技術と人間　(ｲ)エネルギー資源（内容の取扱い）”に、『放射線の性質と利用にも触れる：原子力発電ではウランなどの核燃料からエネルギーを取り出していること、核燃料は放射線を出していることや放射線は自然界にも存在すること、放射線は透過性などをもち、医療や製造業で利用されていることなどにも触れる。』と記述されている[1)]。残念ながら、学習指導要領の改訂に伴って平成24年度から導入される新しい教科書には、「放射線」についてわずか1ページ程度の量に表1に示す内容が示されているに過ぎず[3)]、授業では、ホームページ等に公開されているビデオを用いた学習や、調べ学習、放射線測定実験等が行われることが予想される。ビデオや調べ学習においては、生徒はそのままの知識を身に付ければよいが、放射線測定実験においては放射線測定器の取扱いや解析方法、さらには測定する自然放射線や放射性物質について指導者のより深い理解が要求され

＊山口大学大学院教育学研究科

表1　教科書に掲載されている「放射線」の学習内容の一例

内容	具体例
放射線の種類	・代表的な放射線（α線・β線・γ線）の正体、X線
放射線の性質	・大きなエネルギーを持っている、大量に浴びると危険 ・透過する性質がある
自然放射線	・身の回りの放射線(宇宙から、大地から、食べ物から、大気中から) ・放射線検出器によって放射線が多い場所を調べることができる
放射線の利用	・透過性を利用したX線撮影 ・じゃがいもの発芽防止　　　　等

る。また、放射線測定器は高価なものであり、数十台用いた生徒による参加型実験を想定した場合、中学校で準備することは困難なため、文部科学省の委託事業として日本科学技術振興財団が無料で貸し出している簡易放射線測定器「はかるくん」を活用することが推奨され、現時点でも多くの教育現場において実践報告がなされている[4]。そこで、「はかるくん」を用いることを前提に指導者に知っていて欲しい学習内容を表2にまとめる。この表に示す通りに本論文では、第2章において項目①「放射線の基礎知識に関する学習」全般について、第3章では項目②「はかるくん」の特性について、第4章では項目②「はかるくん」の測定方法(平均値と信頼度)について、それぞれ具体的にその内容を示す。なお、項目③及び④についてはそれぞれ別紙『中学校理科「放射線」に関する学習・指導のための基礎研究Ⅱ』及び『中学校理科「放射線」に関する学習・指導のための基礎研究Ⅲ』にて考察を行なうこととする[5,6]。

表2　「放射線」学習において指導者に知っていて欲しい内容

	学習内容	具体例
①	放射線の基礎知識に関する学習	・「はかるくん」が測定するγ線の発生源（第2章）
②	放射線測定器に関する学習	・「はかるくん」の特性（対象物との位置関係）と測定値の相関（第3章） ・「はかるくん」の測定方法（平均値の出し方）と測定値の信頼度の関係（第4章）
③	「はかるくん」特性セットを使った測定実験	・放射性物質から発せられる放射線の正体 ・放射性物質と測定器の『距離』関係に関する定量的検証 ・放射性物質と測定器間の『遮蔽物』の影響に関する定量的検証　　等（引用文献5）
④	自然放射線測定実験	・中学校校内での放射線測定場所の設定方法の検討（引用文献6）

２．放射線の基礎知識に関する学習

中学校理科教科書において、放射線にはα線、β線、γ線、X線などの種類があることや、これらの正体、放射線の透過性とその利用について非常に簡潔に記述されている。これら放射線の性質と利用に関する基礎知識は、多くの出版物により容易に得ることが可能なためこれらを参照して頂き[7]、ここでは自然放射線の中でも特に「はかるくん」の測定対象であるγ線発生源の宇宙線と大地からの放射線について述べる。なお、「はかるくん」は4種類存在し(DX-200、DX-300、メモリー、Ⅱ）、全てγ線測定器であり、はかるくんⅡのみがβ線測定機能を合わせ持つ[4]。以下、特定の機種を指す場合は各々の名称を記すが、測定器全般としての場合は「はかるくん」を用いる。

２－１　宇宙線について

宇宙線は、地球の大気外から入射する一次宇宙線と、一次宇宙線が大気内で核反応することにより発生する二次宇宙線に分けられる。一次宇宙線は、陽子89%、He原子核9%、Heより重い原子核1%の割合となっており、二次宇宙線は陽子、中性子、π中間子、μ粒子等により構成されている(図1)[8,9]。このように宇宙線は、

一次宇宙線を起源として、様々な種類の放射線や放射性核種を生じている。また、地表付近では1cm^2に一分間あたり1個ほどの宇宙線がやってきて、その約70%はμ粒子、残りの大部分が電子、陽子、γ線である。つまり、「はかるくん」は、たくさんある宇宙線のごく一部を測っているのである[10]。一般に宇宙線のエネルギーが非常に高く、「はかるくん」の測定エネルギー範囲(150keV～3MeV)内に入らないということから考えても同様のことが言える[4]。
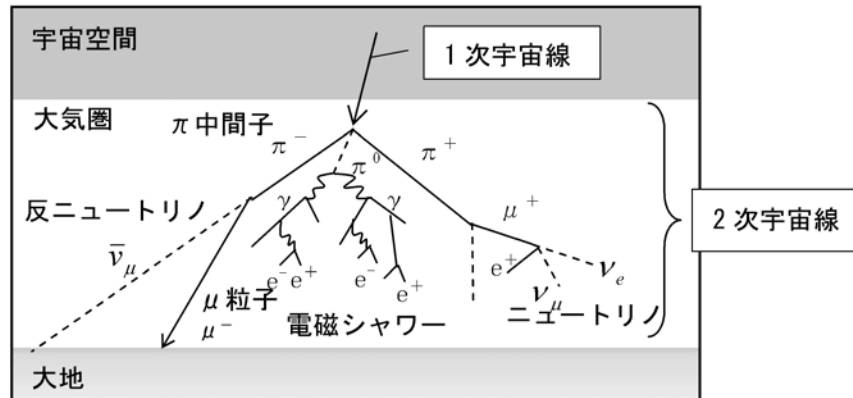
図1　宇宙線が大地に届くまでの概略図[9]

２－２　大地からの放射線について

「はかるくん」を用いて観測される主たる放射線は大地からの放射線である。この大地を構成する岩石中の主な放射性物質は、地球誕生の時から存在する長寿命の放射性核種である^{40}Kや^{87}Rb、さらにはウラン系列及びトリウム系列に存在する放射性核種である。ここでウラン系列、トリウム系列とは、それぞれ^{238}Uと^{232}Thを出発放射性物質として次々と放射線(α線、β線、γ線)を放出して別の放射性物質に変化(壊変)していく一連の放射性原子核の系列のことを言い、例えばウラン系列は表3に示すように最終的に安定同位体である^{206}Pbとなる一群として示される。詳細な崩壊の様子の例としてウラン系列の最初の親核種である^{238}Uの崩壊図(天然Uの同位体の99.284%を占める)を図2に示す[11]。図2では、^{238}Uがα崩壊によって4.147MeV(23%)と4.194MeV(77%)の2つのエネルギーのα線を放出し、さらに余分な0.050MeVをγ線として放出して^{234}Thに変わる様子を表している。例に挙げたような崩壊がそれぞれの放射性物質固有に行われ、地殻に含まれる個々の放射性物質の含有量は場所によって異なることから、大地からの放射線の強度やエネルギーも場所によって異なる。残念ながら「はかるくん」では、どの核種からのγ線を測定しているかについては区別できず、特定のエネルギー領域(150keV～3MeV)にある複数のγ線を合算して観測していることになる。γ線は透過性が高く、自然界に多く存在するため放射線測定の指標として測定対象となることが多いが、指導者としては、大地から多種の放射線が出ており、「はかるくん」が測定するのはその中の一部であることを知っていなければならない。なお、大地からの放射線発生源は通常、先に述べた自然放射性核種が主であるが、人工放射性核種が大地を汚染する場合もある。福島第一原子力発電所事故では人工放射性核種が多数放出され、^{131}Iや^{137}Csの土壌汚染が問題となった。これらの核種は原子力発電の燃料である^{235}U(天然U中の0.720%に相当)の核分裂生成物であり、^{131}Iや^{137}Csがよく取り上げられる理由は、収率(核分裂後にその核種が生成される割合)が比較的高い(^{131}Iは2.83 %、^{137}Csは6.09%)、気体であり拡散しやすい、放射線量が強い事があげられる。また、ヨウ素は放射線量が強いだけでなく、甲状腺に溜まってしまうため、甲状腺が集中的に被ばくしてしまうこともその理由である。

表3　ウラン系列の崩壊系列図。主な放射性核種を示す。

放射性核種	^{238}U→	^{234}Th→	^{234}Pa→	^{234}U→	^{230}Th→	^{226}Ra→	^{222}Rn→	^{218}Po→	(中略)	^{210}Po→	^{206}Pb
半減期	4.468 ×10^9y	24.10d	1.17m	2.455 ×10^5y	7.538 ×10^4y	1.600 ×10^3y	3.824d	3.10m	－	138.4d	なし (安定)
放出される放射線	α，γ	β，γ	β，γ	α，γ	α，γ	α，γ	α，γ	α，γ	－	α，γ	－
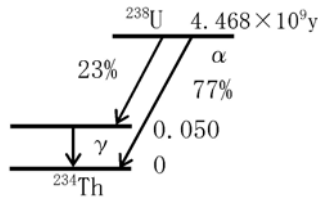
図2 ^{238}Uの崩壊図[11)]

３．放射線測定器に関する学習：「はかるくん」の特性①「測定分布」

第1章で述べたように、放射線に関する基礎知識(第2章)を習得することと同様に放射線測定器の特性を理解することも重要である。本章では簡易放射線測定器「はかるくん」の測定分布について実験・考察した結果をまとめる。この「はかるくん」については“はかるくんの使い方[4)]”にその詳細が以下のように記載されている。

・「はかるくん」はγ線を測定している(はかるくんⅡはβ線も測定可能)。
・＋印の内部には放射線を感じる1cm^{3}のセンサー(CsI)がある。
・四方八方からのγ線を測定している。

「四方八方からのγ線を測定している。」ということに関して、運動場など広域の測定を行なう場合はそのまま理解して良いかもしれないが、ある特定の対象物を測定する場合には「はかるくん」の向きや位置に注意する必要があると考える。また、四方八方から均一に測定しているのではなく、測定に方位性があることも考えられる。そこで、「はかるくん」の測定方位に関する異方性を調べるために方トリウム石を用いて放射線源の位置と観測される放射線量の関係を調べる実験を行った。実験に用いた方トリウム石の情報及び実験の様子を表4と図3にそれぞれ示す。方トリウム石から出る放射線はトリウム系列を構成する放射性核種からのものであり、「はかるくん」はエネルギーの異なるγ線を同時に測定していることとなる[5)]。代表として図4に^{232}Thの崩壊図を示す。なお、測定分布作成のために方トリウム石を用いた理由としては、採用した石の大きさが小さく、測定点を質点とみなして良いと判断したことと、放射線量が強すぎず弱すぎない最大4.632μSv/h程度であったことが挙げられる。本測定は「はかるくんⅡ」を用いており、表面の放射線量の測定分布について3-1小節に、測定する空間の縦断面と横断面の測定分布について3-2小節にそれぞれ示す。

表4　線源(方トリウム石)の情報

鉱物名	方トリウム石
産出国	マダガスカル
形状	卵型
最大長	0.897 cm
最短長	0.471 cm
質量	1.0029 g
放射性核種	トリウム系列に属する放射性核種
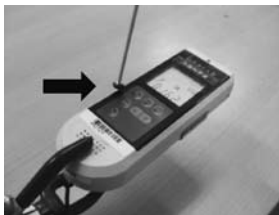
図3　測定の様子。棒の先(矢印)の線源を移動させて測定を行った。
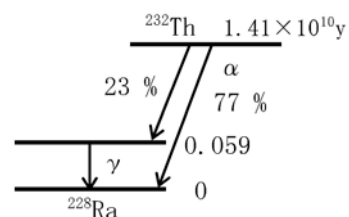
図4　^{232}Thの崩壊図[11)]。エネルギーの違う2本のα線と、γ線を出している。

３－１　「はかるくん」表面における測定（対象物を接しさせて測定するケース）

対象物に対する「はかるくんⅡ」の接し方が測定値にどれだけ影響を与えるかを明らかにするため、「はかるくんⅡ」の表面のさまざまな位置に方トリウム石を置き、その部分での放射線量の測定を行なった。最大値4.632μSv/hを100として、それぞれの値を百分率で表した結果を図5に示す。この結果から「はかるくんⅡ」では、各面の最大測定値が表面(68%)＜上側面(84%)＜裏面(100%)の順に高くなっていることが読み取れる。この傾向は同型の「はかるくんメモリー」においても観測されたが、「はかるくんDX-300」においては、上側面(51%)＜表面(58%)＜裏面(100%)の順に高くなる結果になった。これは、＋印から上側面までの距離が、「はかるくんⅡ」は0.35cmであるのに対し、「はかるくんDX-300」は4倍強の1.5cmであることが影響していると考えられる。このことから、対象物と「はかるくん」を接しさせて測定する場合、「はかるくん」の測定面(接地面)に注意を払う必要があり、さらに異種機種間での比較は好ましくないといえる。また具体的には、質点に近い形状の放射性物質同士の放射線量を比較する場合は、測定場所がほんの1cmずれただけで大幅に値が変わるため本質的な比較ができなくなることや、花崗岩の石材のように大きなものであっても、どの面で測定するかによって値が変わることに注意が必要であることが分かった。
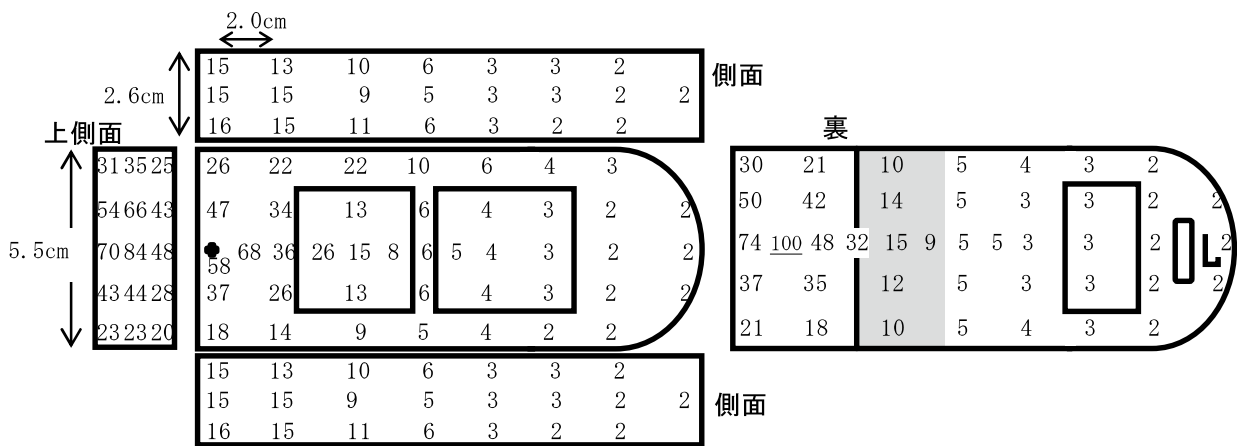
図5　「はかるくんⅡ」表面の放射線量の分布。最大値4.632μSv/hを100として百分率で表記している。基本的に2cm間隔での測定だが、＋印付近の中心線は主に放射線が測定される場所と考え、1cm間隔で測定した。

３－２　縦断面と横断面の測定分布(広域または自然放射線測定のケース)

3-1小節では対象物の測定における注意事項を述べた。次に、広域の測定(一般に宇宙や大地からの自然放射線測定)における空間依存性を調べた結果を示す。具体的には測定器の表面の＋印を中心とし、縦断面と横断面に対して±7～8cmの間を1cm間隔で方トリウム石を設置し、そこから受ける放射線量(γ線)の測定を行った(図6、7)。得られた結果からは、「はかるくん」はγ線を全空間から均等に観測しており、広域での測定においては測定器の向きは影響しないことがわかる。また、3-1小節で述べたように対象物を測定器の面に接しさせる場合においても、対象物以外からくる放射線の影響を避けられないことに注意すべきと言える。因みに、「はかるくん　DX-300」においても同様の空間依存性が確認され、残りの2機種においても基本構造が同じであることから同様の結果が予想される。
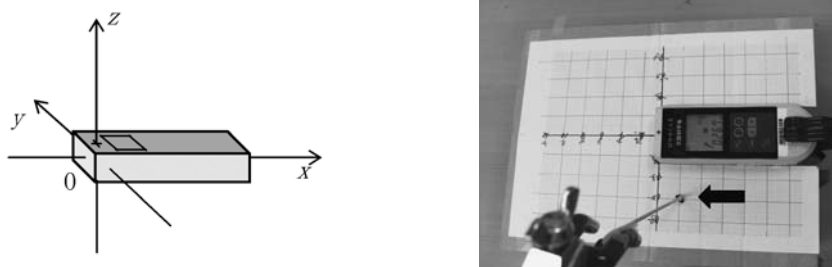
図6　実験方法の概略図。(左)「はかるくん」の測定の中心を原点として3次元座標に置いたと仮定した図。(右)左図における*xy*平面の測定の様子(矢印は方トリウム石の位置を表している)。
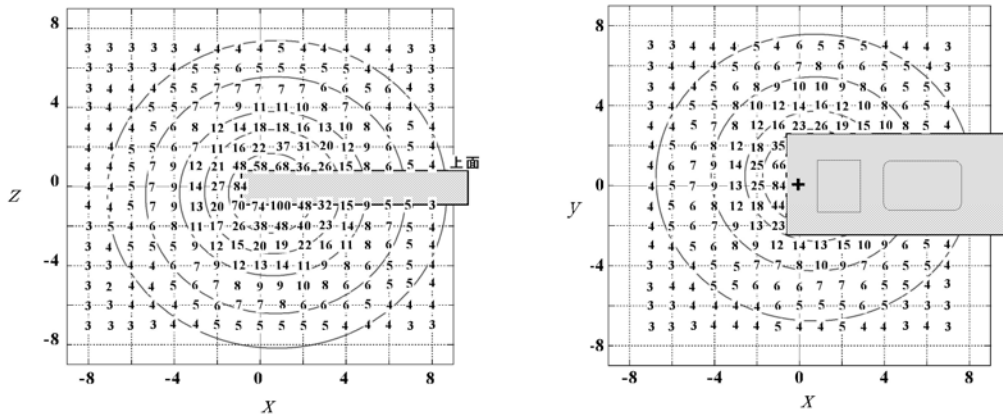
図7　「はかるくんⅡ」測定分布。(左)*xz*面、(右)*xy*面。最大値4.632μSv/hを100として百分率で表している。

４．放射線計測器に関する学習：「はかるくん」の特性②「平均値と信頼度」

「はかるくん」を用いた測定では複数回測定した値の平均値を用いることが慣例となっている。この時に、測定誤差があるのか、何回同一測定を行なえば誤差を減らすことができるかなどの知識が必要となる。しかし、「はかるくん」で測定した値の取扱いについて資料“はかるくんの使い方”[4]には明確に示されず、教師の判断に任されている現状である。そこで本章では、信頼度の高い平均値を得るための測定時間や回数について、数式を用いて定量的に検討した結果を示す。因みに、放射性核種の崩壊は、常に一定の時間間隔で繰り返される事象ではなく、偶発的に起きる事象であるため、放射線測定における統計的誤差としてポアッソン分布などを用いたフィッテングが議論されているが[12]、この点は教育現場で活用できる内容ではないため本論文では扱わないこととする。

４－１　「起動後1分間待つ」という意味・「表示される値」の意味の確認

測定時間や回数について検討する前に、「はかるくん」の測定方法を実測によって確認した結果を示す。取扱説明書には、「はかるくん」の測定値は10秒ごとに変わり、正確な値を表示するためには1分間(60秒)待つ必要があると書かれている。この意味を正確に理解するために、測定値を記録し始めてから100秒後に線源(燐灰ウラン鉱)を近づけ、300秒後に遠ざけた時の放射線量の変化を追った(図8)。ここで方トリウム石ではなく燐灰ウラン鉱を用いた理由は、燐灰ウラン鉱の放射線強度が強く、10秒毎の測定値の変化をより簡潔かつ定量的に議論できるからである。燐灰ウラン鉱から放出される放射線は、表3及び図2に示した^{238}U及びウラン系列中の放射性核種からのものである。
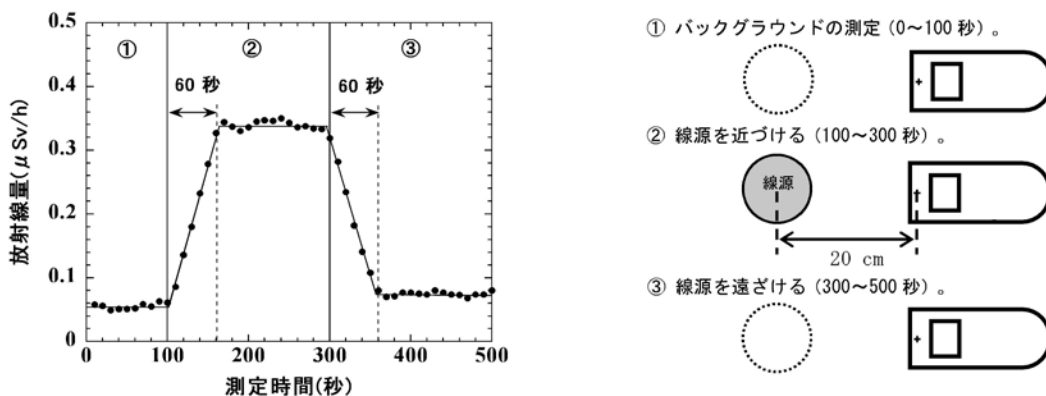
図8　(左)「はかるくん」の測定値の時間変化。10秒ごとの測定を500秒間行った。安定した時間の平均値は、①0～100秒：0.056μSv/h、②160～300秒：0.338μSv/h、③360～500秒：0.075μSv/hであった。(右)実験方法の概略図。なお、「はかるくん」と線源の距離は、＋印から線源の中心まで20㎝である。

線源を置いた時点から測定値は1次関数的に増加し、ちょうど1分後に定常的な値0.338μSv/hになった。さらに線源を外すと1次関数的に減少し、ちょうど1分後にバックグラウンドに戻ったことから、測定値は過去1分間の10秒ごとの測定値の和であり、その数値をμSv/h単位に変換しているということが確認された。また、強い放射線量を測定した後のバックグラウンドは前のバックグラウンドより若干高い値を示す傾向があり(前：0.056μSv/h、後：0.075μSv/h)、放射線量の強度の大きく違うものを連続的に測定する場合には注意が必要だということが明らかとなった。結論として始動後1分間待つという行為は重要であるということの確認ができ、さらに過去１分間の放射線量を正確に積算していることも確認された。

４－２　「はかるくん」平均値算出方法の定量的評価(数式による考察)

本小節では 4-1小節で得られた結果を踏まえ、測定時間や回数に対する考察を行なう。多くの文献には「10秒ごとの値を3回読み取り、その平均値を用いる」と記載され、回数については5回や10回というものから、精度をよくするためには1000回の測定が必要というものまである。しかし、10秒ごとの表示値を用いた場合、多くの部分で観測量の重複があり、求めた値が真の平均値を表していないという問題がある。また、回数を増やすと平均値の信頼度が上がることは理解できるが、1点を1000回も測定する程「放射線」の単元に時間をかけられず、平均回数を検討する必要がある。そこで、ここでは通常の測定方法として採用されている10秒ごとの表示値を用いた『10秒モデル』と、意図的に測定値の重複を避けた『1分モデル』を考え、数式による検討を行った。これらの時間に関する概念図を図9に示す。
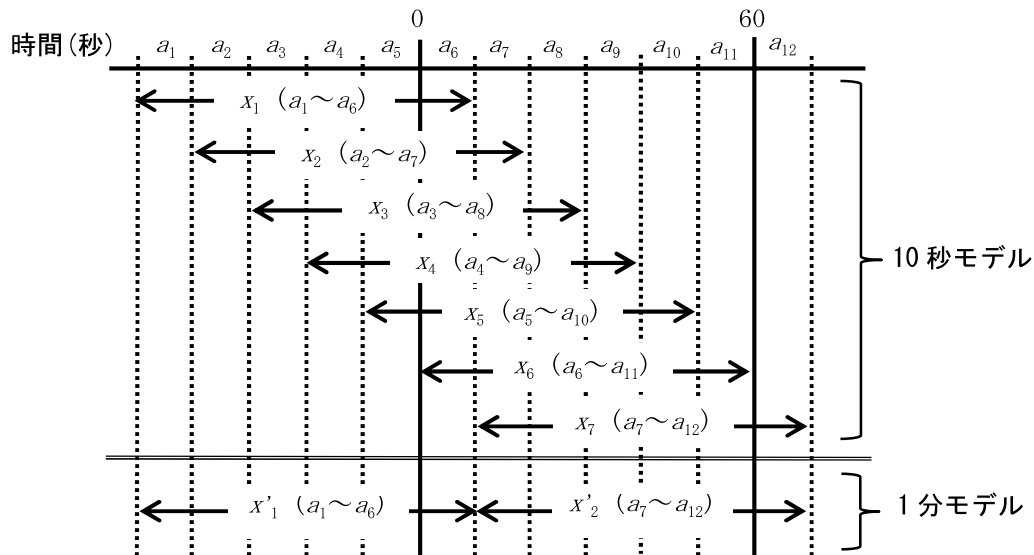
図9　「はかるくん」測定方法の概略図

図9では、10秒ごとに測定される放射線量を「測定成分a_i」と定義しており、例えば測定開始後10秒後の表示値x_1は-50秒から10秒まで(測定成分a_1～a_6)の和となっている。このようにして『10秒モデル』の表示値x_nを求める一般式は、(1)式のように表される。

$$x_n = \sum_{i=n}^{n+5} a_i \qquad (1)$$

また (1)式を変形して、

$$x_1 = x_1, \quad x_n = x_1 + \sum_{i=2}^{n}\left(a_{i+5} - a_{i-1}\right) = x_{n-1} + \left(a_{n+5} - a_{n-1}\right) \quad (n \geq 2) \qquad (2)$$

と表すこともでき、ある時間における表示値x_nは10秒前の測定値x_{n-1}に対して古い測定成分a_{n-1}を削除し、新しい測定成分a_{n+5}を追加した値であることが分かる。つまり、測定値x_nとx_{n-1}は60秒のうち50秒分は同じ測定成分で構成されており、通常これらの値に大きな差は無いということが理解できる。一方、測定成分a_iの重複を避けた『1分モデル』の表示値x'_mを求める一般式は、

$$x'_m = \sum_{i=6m-5}^{6m} a_i \tag{3}$$

と表される。なお、『10秒モデル』と『1分モデル』の測定値は$x'_m=x_{6m-5}$という関係を持つ（$x'_1=x_1$、$x'_2=x_7$）。また、それぞれ『10秒モデル』x_nと『1分モデル』x'_mの表示値を用いて平均値を求める関係式は(4)式で表される（ただし、ぞれぞれ$n>2$, $m>2$である）。

$$\bar{x} = x_1 + \frac{\left\{\sum_{j=2}^{n}\sum_{i=2}^{j}\left(a_{i+5} - a_{i-1}\right)\right\}}{n}, \qquad \bar{x}' = \frac{\sum_{i=1}^{6m} a_i}{m} \tag{4}$$

平均値を計算するに当たり、『1分モデル』は測定成分a_iに重複がないことから真の平均値を求めることが可能であるが、同じ測定回数の場合『10秒モデル』の最大6倍弱の時間を要することが難点である。ここから(4)式を用いて、測定回数は異なる($n \neq m$)が要した時間が同じである場合（4-2-1小節）と測定回数は同じ($n=m$)だが要した時間が異なる場合(4-2-2小節)に分けて考察を行なう。

４－２－１　測定回数は異なる($n \neq m$)が要した時間が同じである場合

図9や(2)式から分かるように、『10秒モデル』では測定値x_nの平均値を求める時、分母で「測定成分a_i」の重複が起こる。x_7はx_1測定後の1分間の測定を意味しa_iは連続しているため、この測定成分a_iの重複具合をまとめ直すと図10のように表される。なお、ここでは例として測定時間130秒(n=13、m=3)で平均値を計算する場合について検討する。
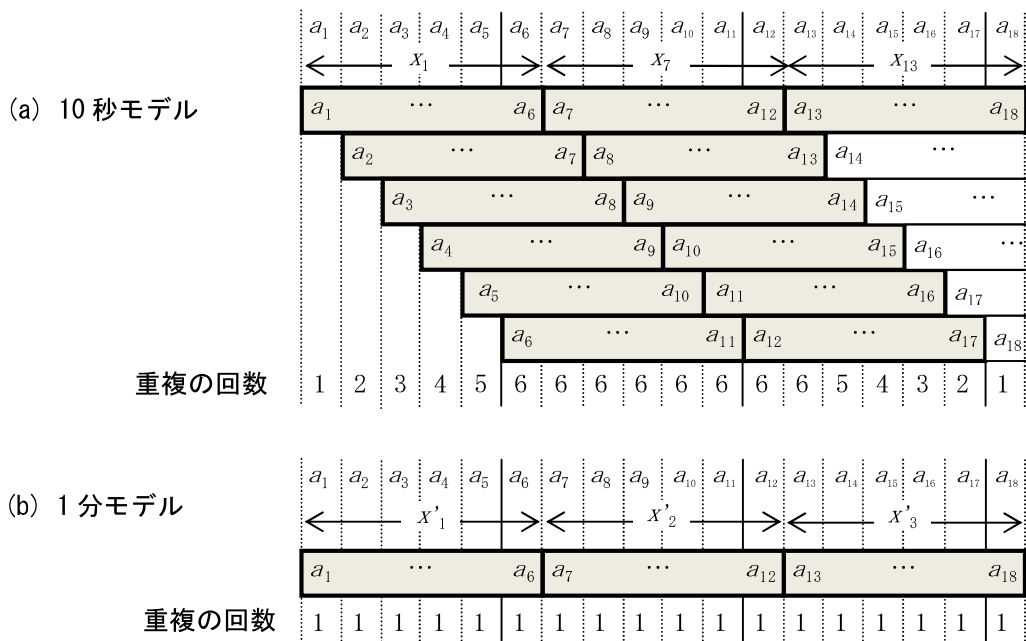
図10　測定時間130秒の場合の測定成分の重複具合。同じ値をとる測定成分a_iを重ねて示している。

図10(a)『10秒モデル』において注目すべきことは各測定成分a_iの重複度は最大6であり、$n \geqq 6$の場合測定成分の最初と最後の各5成分が段階的に増減し、除く中央部分は最大値6を示すことである。今回のケースではn=1～13の平均値は（4)式より以下のように示される。平均値を求める時には図10の重複の回数がa_iの重みとして計算されることも見て取れる。

$$\bar{x}_{(n=1\sim13)} = \frac{a_1 + 2a_2 + 3a_3 + 4a_4 + 5a_5 + 6\left(a_6 + \ldots + a_{13}\right) + 5a_{14} + 4a_{15} + 3a_{16} + 2a_{17} + a_{18}}{13} \tag{5}$$

さらに、『1分モデル』の場合も同様に示す。

$$\overline{x}'_{(m=1\sim3)}=\frac{a_1+a_2+a_3+a_4+a_5+\ldots+a_{14}+a_{15}+a_{16}+a_{17}+a_{18}}{3} \quad (6)$$

(5)、(6) 式から独立な測定成分a_iの数は18個と同じであるが、『10秒モデル』では測定成分a_iの重みが1～6まで存在するのに対し、『1分モデル』は重みが均等となっている。このことから、『1分モデル』が本当の意味での平均値を表していることが分かる。ただし、『10秒モデル』の方が同じ値を何度も加算しており分母も大きいことから、見かけ上誤差の少ない平均値となることも見逃してはならない。測定時間が同じ場合『1分モデル』の方が正しい平均値を計算する方法であるにも拘らず、『10秒モデル』で計算した平均値の方が誤差が少ないという矛盾が生じる。

４－２－２　測定回数は同じ($n=m$)だが要した時間は異なる場合

図10を用いて$n=m=3$の場合を考える。この場合、『10秒モデル』($n=3$)は測定時間30秒であり、構成する測定成分は図9(a)の３ブロック分(x_1, x_2, x_3)に相当する。平均値は(7)式のように表される。

$$\overline{x}_{(n=1\sim3)}=\frac{a_1+2a_2+3(a_3+a_4+a_5+a_6)+2a_7+a_8}{3} \quad (7)$$

ここでは独立な測定成分a_iの数は8個である。一方、『1分モデル』($m=3$)は測定時間130秒であり、(6)式で表される。(7)式は『1分モデル』に比べて測定成分a_iの重みの偏りが顕著であり、求められる平均値も偏ることが予想できる。測定回数のみを考えるならば、『1分モデル』を採用すべきであるが、時間がかかりすぎるという問題が生じる。

４－２－３　「10秒モデル」と「1分モデル」の係数(重複度)の違い

4-2-1及び4-2-2小節で示した結果から、正しい測定方法は『1分モデル』であるという事と、測定時間が同じ場合は『10秒モデル』を採用した方が求めた平均値からの誤差が少なく、測定回数が同じ場合は長い測定時間を要するが『1分モデル』を採用した方が良いという事実が改めて確認された。本小節では測定する回数を変化させて、『10秒モデル』と『1分モデル』の平均値における係数の重複度に関する系統的な考察を行う。図11に(4)式により導かれた放射線の測定回数と平均値を構成する測定成分a_iの係数の関係を示す。例えば『10秒モデル』$n=3$または$n=13$の場合は(7)、(5)式から測定成分a_iの係数はそれぞれ以下のように分けられる。

○$n=3$の時　(7)式⇒　係数1/3：2個 (a_1, a_8)、係数2/3：2個 (a_2, a_7)、係数3/3:4個(a_3, a_4, a_5, a_6)
○$n=13$の時 (5)式⇒　係数1/13：2個 (a_1, a_{18})、係数2/13：2個 (a_2, a_{17})、係数3/13:2個(a_3, a_{16})、
係数4/13：2個 (a_4, a_{15})、係数5/13：2個 (a_5, a_{14})、係数6/13:8個(a_6～a_{13})

この結果を踏まえて、図11左図に横軸nに対して縦軸は係数に相当する場所に点を置き、さらにその係数の数を記している。具体的には$n=3$の時は1/3, 2/3, 1(3/3)にマークし、それぞれ2,2,4と記し、$n=13$の時には1/13, 2/13, 3/13, 4/13, 5/13, 6/13にマークし、それぞれ2,2,2,2,2,8と記している。
同様に右図『1分モデル』$m=3$について、

●$m=3$の時　(6)式　⇒ 係数1/3：18個 (a_1～a_{18})

と表されることから、図11右図では$m=3$の時、縦軸1/3のみにマークされ、重複度18が記されている。また、これらの図を見比べることにより、それぞれ『10秒モデル』と『1分モデル』の特徴が以下のように読み取れる。

○『10秒モデル』(図11左図)

1. $n=1$～6の場合は係数の最大値は1であるが、nが7を超えると係数の最大値は$6/n$に従って減少する。
2. a_iの係数値の幅は$n=1$～6においては増加するが、nが7を超えると狭くなる。
3. nが7を超えると係数値$6/n$をとる測定成分a_iの数は増加するが、他の係数値($1/n$, $2/n$, $3/n$, $4/n$, $5/n$)をとる測定成分はそれぞれ2個のまま変動しない。

●『1分モデル』(図11右図)

1. 係数値はあらゆるmに対して1つの値$1/m$しかとらず、その重複度は$6m$で増加する。つまり、各測定成分a_iは同じ重みとして扱われている。

２．この重みはmが増えるに従って減少する。
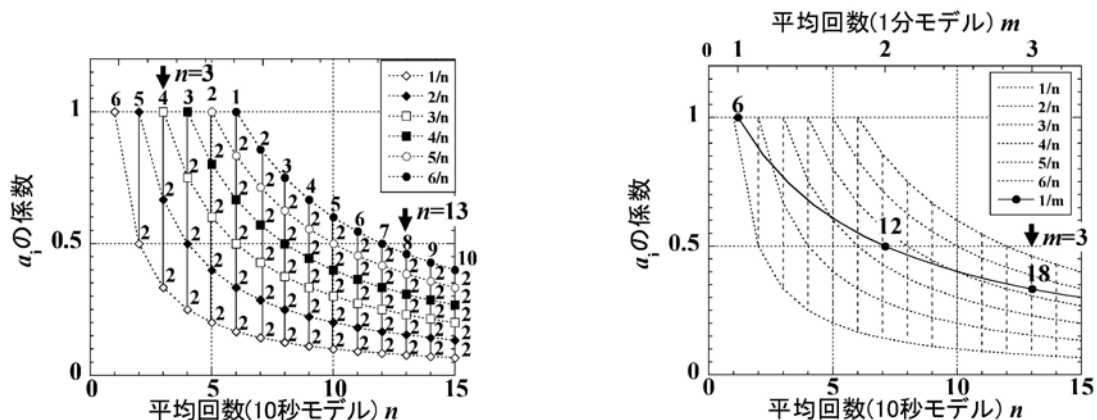
図11　n=15までのa_iの係数と重複の回数。（左）『10秒モデル』、（右）『1分モデル』。グラフ中の数字はその係数をとるa_iの数であり、右図は比較のために『10秒モデル』（左図）を点線で表している。さらに比較しやすいように横軸下部に『10秒モデル』の変数を、横軸上部に『1分モデル』の変数を記した。

さらに両モデル共通として、4-2-1及び4-2-2小節で議論したように測定回数が少ない場合には係数の大きさやその分布に差が生じているが、測定数が増えるに従ってその差が小さくなることが読み取れる。測定回数を増加させた場合をまとめて図12に示す。ここで、太い実線で囲んでいる部分は図11に相当する。図12から『10秒モデル』における6/nの値と『1分モデル』の1/mの値は測定回数が増えるに従って近付いている。『10秒モデル』においては6つの値(破線)をとるが、回数が増えるに従って6/nの重複度が大きくなり、ほとんど6/nの項で構成されていると言って良い。つまり、例えばn=50を超えると『10秒モデル』や『1分モデル』といった測定方法の違いを議論する必要なく、同じと考えて良くなることを意味する。では、何回測定が必要なのかという議論になろうかと思う。現実論として、『10秒モデル』において、6回の測定では、1回目の測定と重複する測定成分が存在し(図9、10)、ここで述べた特徴1～3の考察からも、『10秒モデル』を採用するのではあれば、最低7回以上の測定が必要であり、あとは測定回数が増えれば増えるだけ精度が上がると言える。
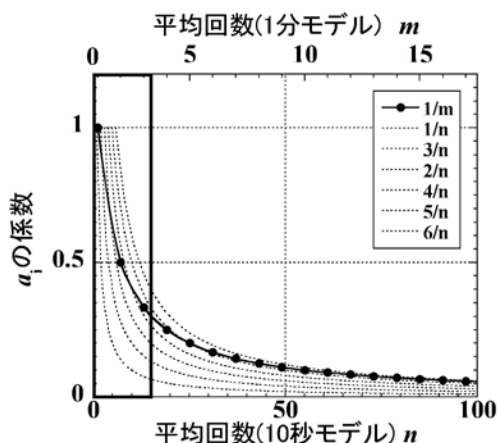
図12　平均回数とa_iの関係。実線が『1分モデル』、破線が『10秒モデル』である。

図11及び12から、『10秒モデル』と『1分モデル』の相違を系統的に評価することができた。しかし数学的には、測定成分a_iが一定である場合は一回の測定で十分であり、測定成分a_iの変動が大きい場合は『10秒モデル』を用いると係数の偏りが大きくなるため、平均回数を増やすか『1分モデル』を採用すべきであることが容易に予想できる。実際には、崩壊は偶発的に起こる事象であるため、複数回の測定が必要である。ただしこの結果から、放射線量の強い線源を測定する場合は少ない回数でよく、放射線量が弱い線源及び大地からの放射線などバックグラウンドの測定や、弱い放射線量同士を比較する場合には回数を重ねる必要があるといえることが明らかとなった。これらのことを考えると、測定にかける時間及び回数を明確に指定す

ることは難しいと言わざるをえない。残念なことに、教育現場での時間的制約を考えると『10秒モデル』で数回の測定が限界であり、この制限を先に考えると正確な測定値を求めることより測定値の差が出やすい事象を測定・比較させることを優先させるべきと考える。

おわりに

中学校理科に「放射線」に関する単元が追加され、指導者には新たな知識の習得が要求されている。放射線学習は、放射線自体の学習に限らず人体への影響、医療への活用、原子力発電など多様な分野に絡んでおり、全てを理解することは困難であるが、「原発安全神話」が崩壊した現在、風評に惑わされることなく正しい知識を身につける必要がある。本論文においては指導者側が事前学習すべき基礎的内容を示したが、引用文献5、6においては中学校理科での教育実践に即した内容に関する情報を示す。特に最後に述べた「測定条件を指定することは難しいため、測定値の差が出やすい対象物を測定・比較させることを優先すべきこと」について具体例を挙げて報告する。

謝辞

本研究は山口エネルギー環境教育研究会（代表：重松）の「エネルギー環境教育ネットワークを活用した人材育成と教育普及」プロジェクトの一環で行なった教育・研究活動の成果報告の一部である。この活動に協力頂いた山口大学教育学部の棟居翼氏、前川真利奈氏に感謝申し上げます。さらに、本論文で述べた活動の一部は（財）日本教育公務員弘済会及び（財）山口大学教育研究後援財団からの研究・事業助成により行った。ここに感謝申し上げます。

引用文献

1）文部科学省：『中学校学習指導要領解説　理科編(平成20年9月)』，大日本図書株式会社，2008.
2）例えば、放射線教育推進委員会：「らでぃHP」　http://www.radi-edu.jp/
3）例えば、塚田捷他：『中学校理科教科書「未来へひろがる　サイエンス」』，啓林館，2012.
4）日本科学技術振興財団：「はかるくんweb 」　http://hakarukun.go.jp/
5）内田由美子，松永武，西山桂，重松宏武：「中学校理科「放射線」に関する学習・指導のための基礎研究Ⅱ」，山口大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要，33，2012.　投稿中
6）内田由美子，松永武，重松宏武：「中学校理科「放射線」に関する学習・指導のための基礎研究Ⅲ」，山口大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要，34，2012.　投稿予定
7）例えば、佐々木康人：『身近な放射線の知識』，丸善株式会社，2006.
8）大塚徳勝：『Q&A放射線物理』，共立出版株式会社，1995.
9）兵藤申一，福岡登，高木堅志郎：『高等学校　物理Ⅰ　改訂版』，啓林館，2009.
10）新興出版社啓林館：「高校理科　啓林館ユーザーの広場」　http://www.keirinkan.com/
11）海老原熊雄：『改訂第3版　アイソトープ便覧』，丸善株式会社，1984.
12）高度情報科学技術研究機構：「原子力百科事典ATOMICA」　http://www.rist.or.jp/atomica/